

衝撃波と二つの渦の干渉による音の発生

Sound Generation by Shock-Vortices Interaction

○ 高橋智之, 東北大学流体科学研究所, 〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

大沼盛, 東北大学流体科学研究所, 〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, Email: ohnuma@ifs.tohoku.ac.jp

井上督, 東北大学流体科学研究所, 〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, Email: inoue@ifs.tohoku.ac.jp

Tomoyuki TAKAHASHI, Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai 980-8577, JAPAN

Sakari ONUMA, Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai 980-8577, JAPAN

Osamu INOUE, Institute of Fluid Science, Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai 980-8577, JAPAN

The development of a flow field and the generation of sound due to the interaction between a shock wave and two vortices are simulated numerically. The two-dimensional Navier-Stokes equations are solved with the sixth-order compact Padé scheme in space, and with the fourth-order Runge-Kutta integration in time. The results show that the reflected shock waves, which are generated by the interaction between the incident shock wave and each vortex, interact with the other vortex and split into two waves. For sufficiently strong vortices, this process successively appears.

1. 緒言

衝撃波と渦の干渉が、超音速航空機やロケットより発生する騒音の原因の一つであることはよく知られている。この衝撃波と渦の物理現象に関してこれまでに多くの理論的研究 [1] や実験的研究 [2] がなされてきている。超音速乱流場では多数の衝撃波と渦が相互に干渉するため、流れ場は非常に複雑となり現象を理解するには多大な困難が伴う。これまでこの複雑な流れ場を解明する第一歩として平面衝撃波と単独渦が干渉する流れ場についての数値計算が行われている [3,4]。本研究では次の段階として平面衝撃波と二つの渦が干渉する流れ場を数値的に捉え、その流れ場のメカニズムを調べた結果について報告する。

2. 計算方法

基礎方程式には二次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いる。空間微分は 6 次精度 Padé 型コンパクトスキーム (境界 3 次精度) [5]、時間進行に 4 次精度の Runge-Kutta 法を用いる。境界条件は無反射境界条件 [6] とする。計算方法は基本的には参考文献 [3,4] と同じである。

流れ場のモデル図を Fig.1 に示す。衝撃波を $x = 0$ に固定した座標系を用いる。計算領域は、渦核半径を基準長さとして、 $-70 \leq x \leq 12$ 、 $-40 \leq y \leq 40$ とした。格子は非一様矩形格子を採用し、格子点数は 1028×2556 である。また、衝撃波前面の音速を基準速さとして、衝撃波マッハ数を $M_s = 1.05, 1.2$ 、渦のマッハ数を $M_v = 0.25, 0.5$ と設定した。渦核半径と衝撃波前面の音速に基づくレイノルズ数は $Re = 800$ である。渦の初期位置は、上の渦が $x = 4.0, y = 4.0$ 、下の渦が $x = 4.0, y = -4.0$ であり、平面衝撃波に対して平行な位置に置いた。また二つの渦の間隔を $L = 8.0$ とした。これは互いの誘起速度が無視できる距離である。

3. 計算結果

3.1 平面衝撃波と単独渦の干渉

はじめに平面衝撃波と単独渦が干渉した場合の流れ場を Fig.2 に shadowgraph および等圧力線図で示す。パラメータは $M_s = 1.05, M_v = 0.25, Re = 800$ である。等圧力線図の赤線部分は $\Delta p > 0$ の圧縮領域、青線部分は

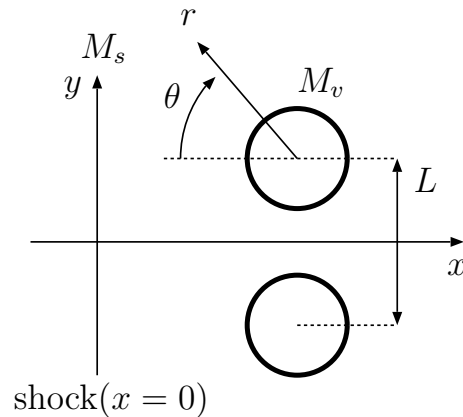


Fig. 1: Schematic diagram of flow model.

$\Delta p < 0$ の希薄領域をそれぞれ表している。ここで、 Δp は $\Delta p = (p - p_s)/p_s$ で定義され、 p_s は衝撃波後流の圧力である。渦の回転方向は反時計回りである。衝撃波が渦と干渉することにより、衝撃波は渦の誘起速度によって変形され、四重極性を持つ precursor が発生し、その後、二つの反射衝撃波が形成される。渦の回転方向が反時計回りであるため、渦の下側の反射衝撃波よりも上側の反射衝撃波の方が強くなり、渦の周方向へと伸びる (Fig.2a)。さらに precursor の背後には precursor とは極性が反転した四重極性をもつ第二音波、第二音波の背後には precursor と同じ四重極性をもつ第三音波が発生する (Fig.2b)。反射衝撃波および音波は渦の径方向へと伝播していく。詳細については参考文献 [3,4] を参照されたい。

3.2 平面衝撃波と二つの渦の干渉

Fig.3 に $M_s = 1.05, M_v = 0.25, Re = 800$ とした場合の流れ場の時間経過を shadowgraph で示す。二つの渦の回転方向はともに反時計回りである。単独渦の場合と同様に、平面衝撃波とそれぞれの渦が干渉することにより precursor および反射衝撃波がそれぞれ形成される (Fig.1a)。二つの渦はともに反時計回りであるので、各々の渦の上側に強い反射衝撃波、下側に弱い反射衝撃波が形成される。この反射衝撃波は渦の径方向に伝播するの

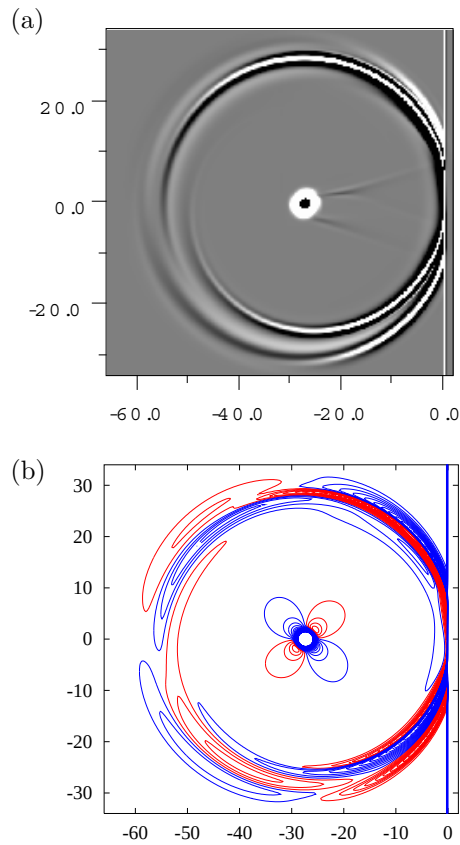


Fig. 2: Flow field for the case of a single vortex. $M_s = 1.05$, $M_v = 0.25$, $Re = 800$, $t = 32$. (a)Shadowgraph. (b)Isobars of Δp . —: positive pressure, —: negative pressure.

で、内側の二つの反射衝撃波は交差し、その後もう一方の渦と干渉する (Fig.1b,1c)。渦との干渉により、この反射衝撃波は渦の誘起速度によって加速・減速されて二つの圧力波に分離し、加速された圧力波は渦に巻き込まれるように回折する。(Fig.1d,1e)。その後、それぞれの圧力波は渦の径方向へと伝播していく (Fig.1f)。反射衝撃波が渦と干渉することにより二つに分離する現象は、衝撃波と渦輪の干渉において見出されており [7]、Fig.3 の結果と定性的に同じメカニズムで生じていると考えられる。

渦の強さを $M_v = 0.5$ と強くした場合の流れ場を Fig.4 に示す。渦の強さを強くすると、Fig.5 に示すように平面衝撃波と渦との干渉によって形成される反射衝撃波は強くなり、また渦の周方向に伸びていく。このため、 $M_v = 0.25$ では反射衝撃波と渦の干渉が2回しか起こらなかったのに対し、 $M_v = 0.5$ では反射衝撃波と渦の干渉が新たに生じ、その結果反射衝撃波が二つの圧力波に分離する現象が連続して起こり、流れ場は複雑となる。

Fig.6 に $t=23$ のときの流れ場と上の渦の中心から $\theta = 135^\circ$ 方向の圧力の空間分布を示す。Fig.6c に比較のために示してある青線は Fig.7c に示してあるもので、これについて補足する。単独渦の圧力場 (Fig.7a) を渦の中心をずらして二つ重ね合わせて圧力の線形和を求めたものが Fig.7b である。Fig.7b の上の渦の中心から $\theta = 135^\circ$ 方向の圧力の空間分布が Fig.7c である。Fig.6c を見ると、

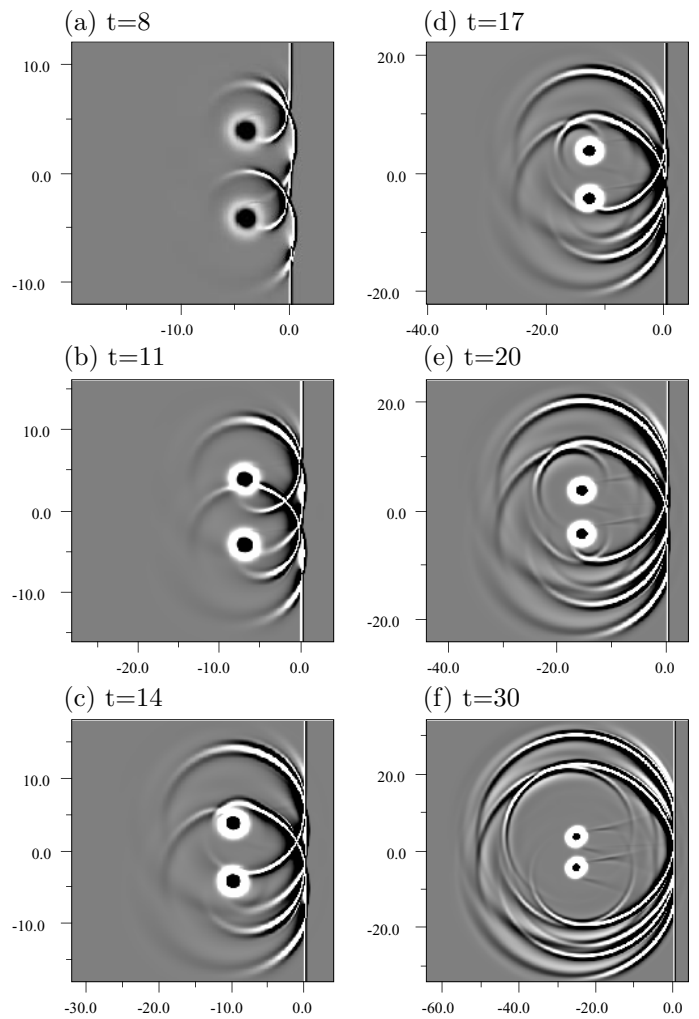


Fig. 3: Time development of a flow field for the case of two vortices. Shadowgraph. $M_s = 1.05$, $M_v = 0.25$, $Re = 800$.

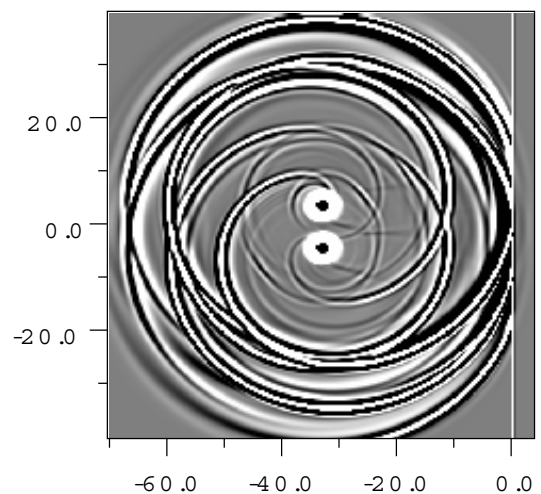


Fig. 4: Shadowgraph for the case of a single vortex. $M_s = 1.05$, $M_v = 0.5$, $Re = 800$, $t = 38$.

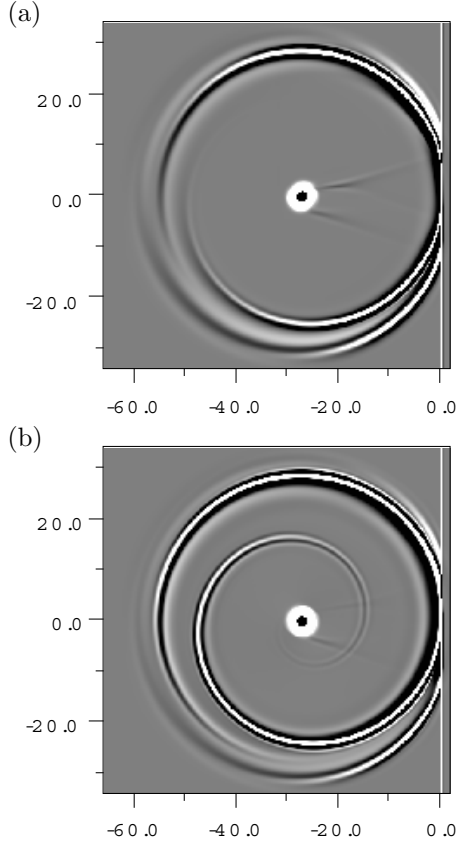


Fig. 5: Shadowgraph for the case of two vortices. $M_s = 1.05$, $Re = 800$, $t = 32$. (a) $M_v = 0.25$. (b) $M_v = 0.5$.

渦の遠方では線形和と非常によく一致しており ($\Delta p_1 \sim \Delta p_3$)、平面衝撃波とそれぞれの渦が干渉することによって発生する音波が単純に重ね合わさり遠方へと伝播していくことが分かる。一方、渦近傍では線形和ではみられない圧力波 ($\Delta p_4, \Delta p_5$) がみられる。上で述べたように反射衝撃波が渦と干渉することにより二つの圧力波に分離するため、その圧力波が現れている。Fig.8 は、Fig.6c で示した圧力のピーク ($\Delta p_1 \sim \Delta p_5$) の渦中心からの距離 r に対する減衰をプロットした図である。それぞれのピークは $r^{-1/2}$ に比例して減衰しており、理論と一致している。これにより反射衝撃波が分離したためにあらわれた圧力波 ($\Delta p_4, \Delta p_5$) も音波として伝播していくことが分かる。

また、ここでは示していないが $M_s = 1.2$ とした場合、 $M_s = 1.05$ の場合との違いは、平面衝撃波とそれぞれの渦が干渉する際に反射の形態が正常反射からマッハ反射が変わるのみで、その他の現象は $M_s = 1.05$ と同様であることが確認できた。

4. 結言

平面衝撃波と二つの渦が干渉する流れ場および発生する音波を直接数値計算によって捉えた。平面衝撃波と各々の渦との干渉により発生した反射衝撃波が、もう一方の渦と干渉することにより二つの圧力波に分離する現象がみられた。さらに、渦の強さが増すにつれ、反射衝撃波は強くなり渦の周方向へと伸びるため、反射衝撃波の分離が連続して起こり、流れ場は複雑になることが分かった。

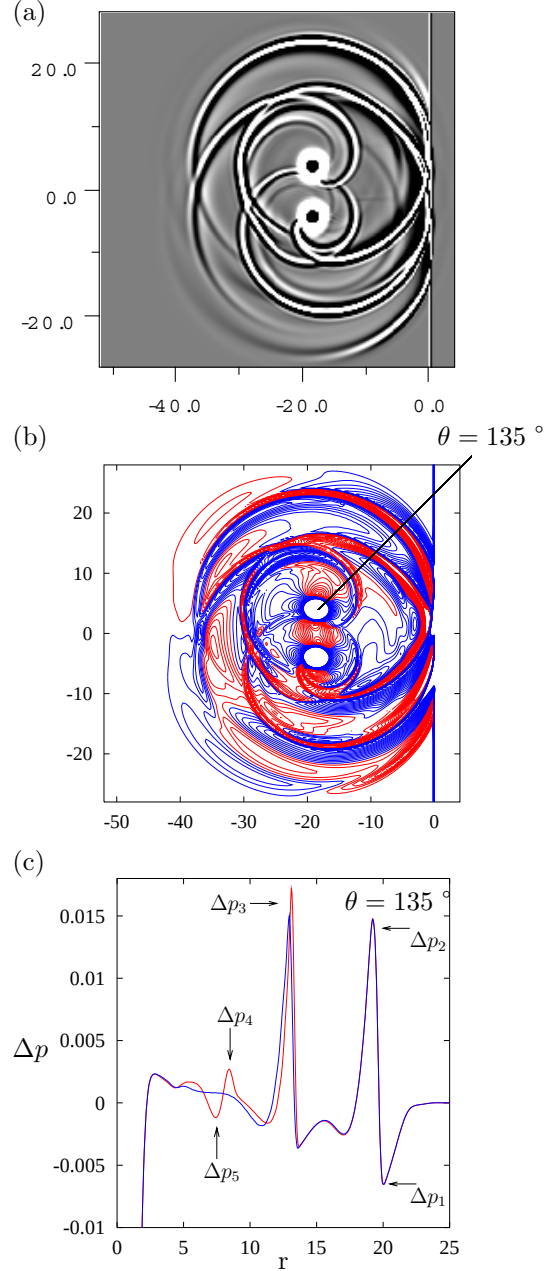


Fig. 6: Flow field for the case of two vortices. $M_s = 1.05$, $M_v = 0.5$, $Re = 800$, $t = 23$. (a) Shadowgraph. (b) Isobars of Δp , —: positive pressure, —: negative pressure. (c) Radial distribution of Δp , $\theta = 135^\circ$, —: DNS, —: superposition of two pressure fields for a single vortex.

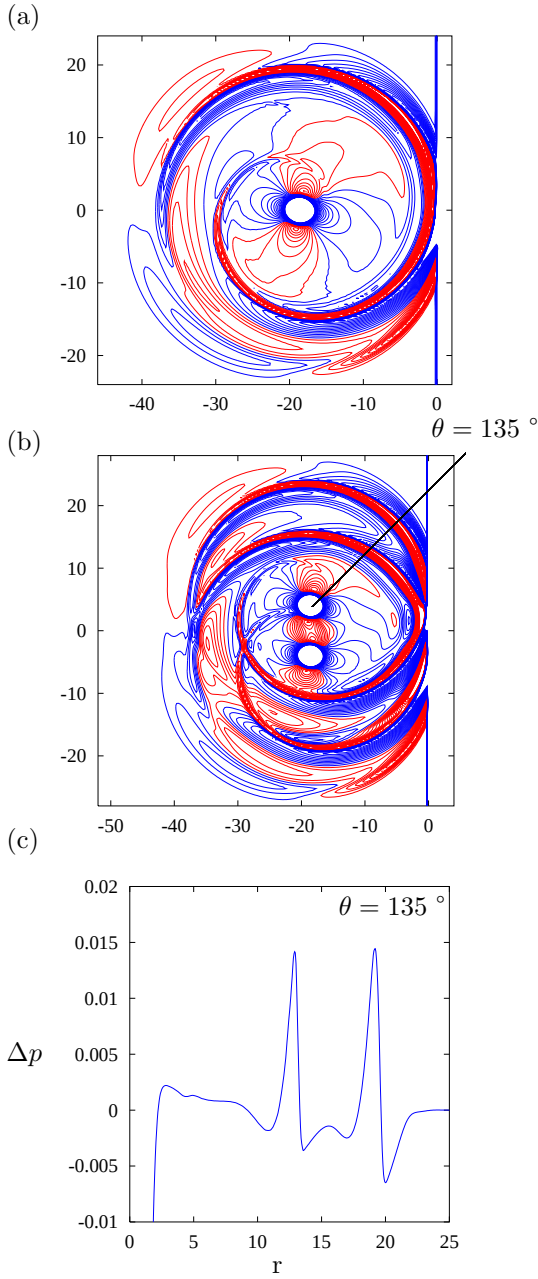


Fig. 7: Superposition of two pressure fields for a single vortex. $M_s = 1.05$, $M_v = 0.5$, $Re = 800$, $t = 23$. (a) Isobars of Δp for a single vortex, (b) Isobars of Δp for the superposition of two pressure fields, —: positive pressure, —: negative pressure. (c) Radial distribution of Δp for (b), $\theta = 135^\circ$.

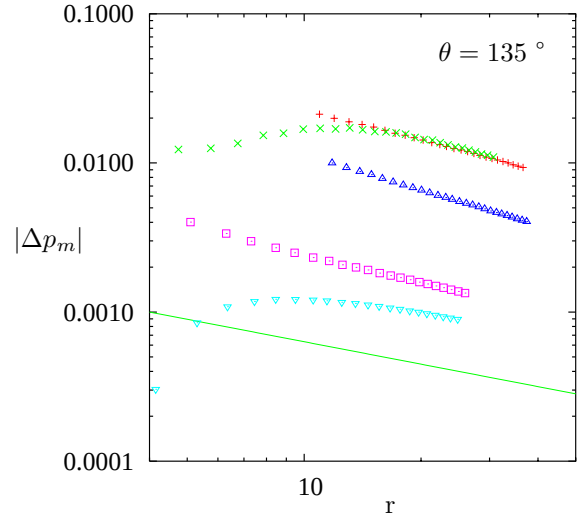


Fig. 8: Decay of the pressure peak Δp_m . $M_s = 1.05$, $M_v = 0.5$, $Re = 800$. +: Δp_1 , Δ : Δp_2 , $\times$: Δp_3 , $\square$: Δp_4 , ∇ : Δp_5 , —: $\propto r^{-1/2}$.

参考文献

1. H. S. Ribner, "Cylindrical sound wave generated by shock-vortex interaction," AIAA J. **23**, 1708 (1985).
2. D. S. Dosanjh and T. M. Weeks, "Interaction of a starting vortex as well as a vortex street with a traveling shock wave," AIAA J. **3**, 216 (1965).
3. O. Inoue and Y. Hattori, "Sound generation by shock-vortex interaction," J. Fluid Mech. **380**, 81 (1999).
4. O. Inoue, "Propagation of sound generated by weak shock-vortex interaction," Phys. Fluids **12**, 1258 (2000).
5. S. K. Lele, "Compact finite difference schemes with spectral-like resolution," J. Comput. Phys. **103**, 16 (1992).
6. T. Poinso and S. K. Lele, "Boundary conditions for direct simulation of compressible viscous flows," J. Comput. Phys. **101**, 104 (1992).
7. O. Inoue and Y. Takahashi, "Successive generation of sounds by shock-strong vortex interaction," Phys. Fluids **12**, 3229 (2000).